

文章编号 1004-924X(2008)07-1279-06

基于自适应窗口选择 PIV 技术的 序列星图运动估计方法

陈维真¹, 陈 标², 张春华², 宋汝刚²

(1. 中国海洋大学 信息技术学院, 山东 青岛 266000;

2. 海军潜艇学院 卫星遥感应用研究所, 山东 青岛 266000)

摘要:提出了一种基于自适应窗口选择粒子图像测速(PIV)技术的序列星图运动参数估计算法。算法通过自适应选取窗口,使得分析窗口内恒星的成像密度达到最大,且窗口边缘区域不存在高亮恒星成像,然后对分析窗口进行互相关计算,求得序列星图的运动参数。仿真试验表明,本文的算法克服了恒星进场或出场导致分析窗口互相关计算精度降低的现象,提高了互相关运动参数估计的精度,将估计误差降低到了 0.01 pixel 以内。该算法可以准确、快速地对星图的全局运动参数进行估计,为序列星图配准奠定了基础。

关键词:粒子图像测速;自适应窗口;星图;运动估计;互相关

中图分类号:TP391;TB934 **文献标识码:**A

Motion estimation algorithm of serial star images based on adaptive window selection PIV technique

CHEN Wei-zhen¹, CHEN Biao², ZHANG Chun-hua², SONG Ru-gang²

(1. College of Information Science & Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266000, China;

2. Remote Sensing Institute, Navy Submarine Academy, Qingdao 266000, China)

Abstract: A motion estimation algorithm of serial star images based on adaptive window selection PIV technique is proposed. The algorithm chooses the analysis window of maximum energy by an adaptive method. Then, the global motion parameters can be estimated through the cross-correlation of two analysis windows. The experimental results show that the presented algorithm improves the precision of parameter estimation, and overcomes the influence introduced by stars moving in or moving out of the analysis window. The algorithm reduces the estimation error to less than 0.01 pixel and can estimate the global motion parameters with high accuracy and high speed. It provides a good way for solving star image matching.

Key words: particle image velocimetry (PIV); adaptive window; star image; motion estimation; cross-correlation

收稿日期:2007-10-22;修订日期:2008-01-22.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2006AA0627)

1 引言

对星空观测 CCD 相机获得的序列图像,由于相机姿态的变化或者观测平台位置的改变,观测的序列图像存在全局运动,需要对星图的运动参数进行准确的估计。星空观测 CCD 图像主要包括恒星、星空背景噪声等。恒星是 CCD 成像的重要组成部分,在图像上表现为点状目标,图像的能量分布,又称点扩散函数(PSF)近似服从对称的高斯分布,PSF 的中心对应观测星的位置^[1-3]。探测的区域条件决定了星空背景噪声的大小,主要包括以深空辐射为主的深空背景噪声和地球临边散射或任何进入相机的杂散光。

粒子图像测速技术(Particle Image Velocimetry, PIV)是自 20 世纪 80 年代以来迅速发展起来的一种以图像处理 and 信号分析等方法为基础的流场测量新技术^[4-5],PIV 源于固体应变位移测量的散斑技术,Adrain 首先将这一技术从原理及方法上引入流场测速中^[6]。Adrain 将 PIV 技术按照跟踪粒子的浓度分为激光散斑测速技术(Laser Speckle Velocimetry, LSV),粒子图像测速技术以及粒子跟踪测速技术(Particle Track Velocimetry, PTV)三类。

当流场中粒子浓度极低时,有可能识别、跟踪单个粒子的运动,从记录的粒子图像中测得单个粒子的位移,这种低粒子图像密度模式的测速方法即 PTV 技术;当流场中粒子浓度很高,以至于用相干光照明时,粒子衍射图像在成像系统像面上互相干涉形成激光散斑图案,这种极高粒子图像密度模式的测速方法即为 LSV 技术;PIV 技术是指选择粒子浓度使其成为较高成像密度模式,但并未在成像系统像面上形成散斑图案,而仍然是真实的粒子图像,此时这些粒子已无法单独识别,只能获得小区域中多个粒子位移的统计平均值。

本文分析了 PIV 粒子图像与星空观测图像的共同点,将流体测量 PIV 技术引入到序列星图运动参数估计中。针对 PIV 分析窗口存在恒星进场或出场造成的互相关计算精度降低的现象,提出了自适应窗口选择算法,算法通过自适应选

取分析窗口使得窗口内的恒星成像密度达到最大,且窗口边缘区域不存在高亮恒星成像。然后对分析窗口进行相关处理,求得星图的全局运动参数。

本文的目的是对序列星图的全局运动参数进行估计,为准确地实现序列星图配准奠定基础。

2 PIV 技术及互相关分析理论

2.1 PIV 技术原理

PIV 技术的计算原理如图 1 所示:粒子 A 在

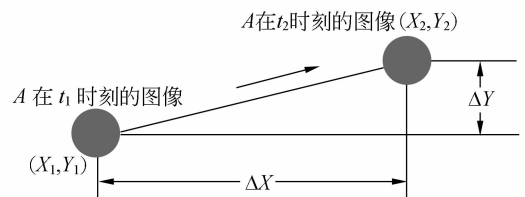


图 1 PIV 计算原理

Fig. 1 Principle of PIV

t_1 时刻的位置为 (X_1, Y_1) , 经过了 Δt 时刻, 也就是 t_2 时刻的位置为 (X_2, Y_2) , 其位移为 $\Delta X, \Delta Y$ 。当粒子运动轨迹接近直线并且沿着轨迹的速度近似恒定, 即位移足够小使得 $\Delta X/\Delta t$ 是速度 U 的很好近似时, 将形成发光粒子对, 在远处产生杨氏干涉, 从条纹中可以得到其位移量。

$$U = \lim_{t_2 \rightarrow t_1} \frac{X_2 - X_1}{t_2 - t_1}, \quad V = \lim_{t_2 \rightarrow t_1} \frac{Y_2 - Y_1}{t_2 - t_1}$$

2.2 互相关分析理论

在实际测量中, 一般情况不可能用跟踪单个粒子的方法来获取速度信息, 而是用若干粒子统计信息来获得速度, 这就需要专门的数据处理方法。粒子图像测速系统获取粒子运动信息的方法有傅里叶变换法、直接空间相关法、粒子像间距离概率统计法等。为了解决分析过程中的方向模糊, 扩大动态测量范围, 提高测量精度, 一般采用基于 FFT 变换的互相关分析法来获取粒子运动信息^[7]。

假设选择区内粒子的位移是均匀的, 第二次曝光形成的图像 $g_2(x, y)$ 可视为第一次曝光形成的图像 $g_1(x, y)$ 经过平移后得到的, 即:

$$g_2(x, y) = g_1(x - \Delta x, y - \Delta y).$$

根据互相关定义:

$$g(x, y) = g_1(x, y) \circ g_2(x, y) = \\ g_1(x, y) * g_2(-x, -y),$$

对 $g_1(x, y)$ 和 $g_2(x, y)$ 取 FFT, 利用 FFT 变换的性质, 有^[8]:

$$g(x, y) = \text{IFFT}(G_1^*(\omega_x, \omega_y)G_2(\omega_x, \omega_y)),$$

其中, $G_1^*(\omega_x, \omega_y)$ 是 $G_1(\omega_x, \omega_y)$ 的共轭值, IFFT 是傅氏反变换, 利用傅里叶变换的平移特性, 有:

$$g(x, y) = \text{IFFT}(|G_1(\omega_x, \omega_y)|^2 e^{-j(\omega_x \Delta x + \omega_y \Delta y)})$$

其中, $e^{-j(\omega_x \Delta x + \omega_y \Delta y)}$ 包含了两幅图像的位置平移信息, 其傅里叶反变换是 δ 脉冲函数, 即:

$$e^{-j(\omega_x \Delta x + \omega_y \Delta y)} \xrightarrow{\text{IFFT}} \delta(x - \Delta x, y - \Delta y).$$

因此, 两幅图像的互相关函数在 $(\Delta x, \Delta y)$ 点存在峰值, 对于有噪声图像, 相关函数不是理想的 δ 脉冲, 但仍然具有较尖锐的相关峰, 在这种情况下, 为了使位移能够达到亚像素的精度, 用高斯曲线来拟合相关峰^[9]:

$x = x_0 +$

$$\frac{\ln R(x_0 - 1, y_0) - \ln R(x_0 + 1, y_0)}{2[\ln R(x_0 - 1, y_0) + \ln R(x_0 + 1, y_0) - 2\ln R(x_0, y_0)]},$$

其中, $R(x_0, y_0)$ 是 $g_1(x, y)$ 和 $g_2(x, y)$ 的互相关峰, 在相关峰所在像素点的横向、纵向、斜向(分母中的 2 改为 $2\sqrt{2}$)4 个方向进行拟合, y 方向可同理实现, 最终确定的即为相关峰(位移)的精确位置。

3 基于自适应窗口选择的序列星图运动参数估计算法

3.1 图像预处理

设一个星像在 CCD 上占有 m 个像元, 定义峰值信噪比为:

$$\text{SNR} = \frac{\text{Amp}_{\text{Target}} - \bar{\mu}}{\bar{\sigma}},$$

其中, $\text{Amp}_{\text{Target}}$ 为恒星峰值幅度, 这里指图像中恒星成像的峰值灰度, $\bar{\mu}$ 为噪声均值, $\bar{\sigma}$ 为噪声方差^[10]。对单帧图像 $f(i, j)$ 中的每个像素, 使用二元假设检验判断目标是否存在:

$$H_0: f(i, j) = n(i, j), \quad \text{目标不存在}$$

$H_1: f(i, j) = s(i, j) + n(i, j)$, 目标存在

若采用单帧门限判决, 并设判决门限为 Th , 则判决准则为:

$$\begin{cases} f(i, j) < Th \Rightarrow H_0 \\ f(i, j) \geq Th \Rightarrow H_1 \end{cases}$$

按上式进行阈值处理来滤除背景噪声, 取 $Th = \bar{\mu} + \text{SNR}_0 \cdot \bar{\sigma}$, 得到图像 $g(i, j)$:

$$g(i, j) = \begin{cases} f(i, j) & f(i, j) \geq Th \\ 0 & f(i, j) < Th \end{cases}$$

通常, SNR_0 取 2~3。

3.2 自适应窗口选择方法

PIV 技术的核心之一是信息处理窗口的选取, 从 PIV 应用角度考虑, 分析窗口越小越能够体现流动的局部特征, 但由于窗口内粒子太少, 粒子分布模型相似的可靠性降低; 相反, 窗口太大时, 由于粒子运动的状态不同致使分析区域偏移, 使得误对应速度向量增多。选取合适的窗口需要根据流场的运动情况而定。

星空观测 CCD 图像与 PIV 粒子图像的共同点可以概括为:

(1) 星图中恒星成像与 PIV 粒子成像均为点状目标, 服从二维高斯分布。

(2) 恒星成像密度属于 PIV 或 PTV 的范畴, 但是无法对单个恒星进行识别, PIV 粒子成像也无法单独识别。

(3) 序列星图的观测通常是在很短的时间间隔内连续拍摄一系列图像, 相邻帧间运动近似服从匀速直线运动模型; PIV 流场测量的条件是选择 Δt , 使 Δt 小到粒子运动轨迹必须是接近直线并且沿着轨迹的速度应该近似恒定。

对于固定相机拍摄的同序列星图, 图像各个区域的运动参数是一致的, 影响星图运动参数估计精度的主要原因如下:

(1) 由于星图中恒星分布不均匀造成在某些区域恒星呈现为高成像密度模式, 而另外一些区域呈现为低成像密度模式, 导致 PIV 分析窗口在某些低成像密度区域存在空白或错误矢量的情况。因此星空图像的 PIV 分析窗口选择的最终目的是选择高成像密度区域。

(2) 由于星图的运动造成的恒星进场或出场

导致分析窗口互相关计算精度降低。

为了提高相关分析的准确度和可靠性,本文提出一种自适应窗口选择方法,提高了互相关计算的准确性,克服了由于图像运动造成的恒星进场或出场对互相关计算精度的影响。

自适应窗口选择的原则是:

(1) 分析窗口内恒星的成像密度最大,目的是保证互相关计算的准确性。

根据 Adrian 1991 年的分法,粒子图像测速技术的像密度 N_1 被定义^[6]为:

$$N_1 = C\Delta Z_0 \frac{hd_1^2}{4M^2},$$

其中, C 为粒子浓度, ΔZ_0 为片光源厚度, M 为照相机的放大率, d_1 为粒子直径。对于同一 PIV 成像系统,影响像密度的主要因素是 Cd_1^2 ,因此像密度可以等效为分析窗口内粒子的能量值。

(2) 分析窗口边缘不存在亮星,目的是最大程度地避免运动造成的分析窗口内恒星进场或出场的影响。

自适应窗口选择的步骤如下:

(1) 对图像 $g(i, j)$ 每个坐标点 (i, j) 的像素值进行判断,当 $g(i, j) \geq T_G$ 时,记为 $P_k(i, j)$,以 P_k 为中心取 64×64 的矩形区域 S_k ,按照下式计算 S_k 区域的能量 E_k 。最终得到 $E = [E_1, E_2, \dots]$ 。

$$E_k = \sum_{(i,j) \in S_k} g(i, j)$$

对于本文所用的 8 bit 灰度图像, T_G 通常取 150~200。

(2) 取出 E 中的最大能量值 E_{\max} ,同时,可以得到与 E_{\max} 对应的最大能量区域 S_{\max} 中心的坐标值 $P_{\max}(i_{\max}, j_{\max})$,以 (i_{\max}, j_{\max}) 为中心取 64×64 大小的窗口 $W_{\max}(64, 64)$,称 $W_{\max}(64, 64)$ 为固定窗口最大能量区域。

(3) 步骤(1)~(2)求得的窗口区域 $W_{\max}(64, 64)$ 的边缘有可能存在一颗或多颗高亮度恒星,当图像产生运动时,在下一帧图像中取对应的窗口区域通常会存在恒星的进场或出场现象,造成相关计算的不准确。因此,在窗口 W_{\max} 中取边缘宽度为 L 的边缘区域,记为 $B_{\max}(B_u, B_d, B_l, B_r)$,如图 2 所示。依次求其每个区域 B_u, B_d, B_l, B_r 的

能量,即区域内像素灰度值的和,当区域的能量超过阈值 T_w 时,则认为边缘区域存在高亮度恒星,按照下式移动窗口中心坐标,同时将窗口尺寸扩大 L ,得到 $W_{\max}(64+L, 64+L)$ 。

$$(i_{\max}, j_{\max}) = \begin{cases} (i_{\max} + L/2, j_{\max}), & \sum_{(i,j) \in B_u} g(i, j) > T_w \\ (i_{\max} - L/2, j_{\max}), & \sum_{(i,j) \in B_d} g(i, j) > T_w \\ (i_{\max}, j_{\max} - L/2), & \sum_{(i,j) \in B_l} g(i, j) > T_w \\ (i_{\max}, j_{\max} + L/2), & \sum_{(i,j) \in B_r} g(i, j) > T_w \end{cases}$$

实验分析,通常取 $T_w = \sum_{(i,j) \in W_{\max}} g(i, j) / 6$ 时

效果较好。 L 为序列图像间最大运动速度的估计值。

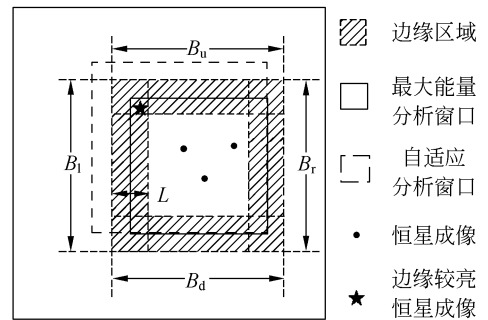


图 2 自适应窗口选择示意图

Fig. 2 Demonstration of adaptive window selection

(4) 重复(3)直到 B_u, B_d, B_l, B_r 区域的能量均 $< T_w$ 。得到分析窗口 $W_{\max}(64+nL, 64+nL)$,其中 n 为自适应窗口调整的次数。

(5) 在第 2 帧图像中以 (i_{\max}, j_{\max}) 为中心取窗口 $W_{\max}'(64+nL, 64+nL)$,通过 W_{\max} 和 W_{\max}' 的相关计算得到两帧图像的运动参数 $V(v_i, v_j)$ 。

4 算法实验

图 3 为某地基望远镜星空观测序列图像的 3 幅图像,图中实线方框区域标记分别为遍历选取固定分析窗口和最大能量固定分析窗口,虚线方框区域为本文自适应选取的分析窗口。其中遍历选取分析窗口的方法如下:利用大小为 32×32 的偏置窗口从图像中遍历选取 64×64 大小的窗口,

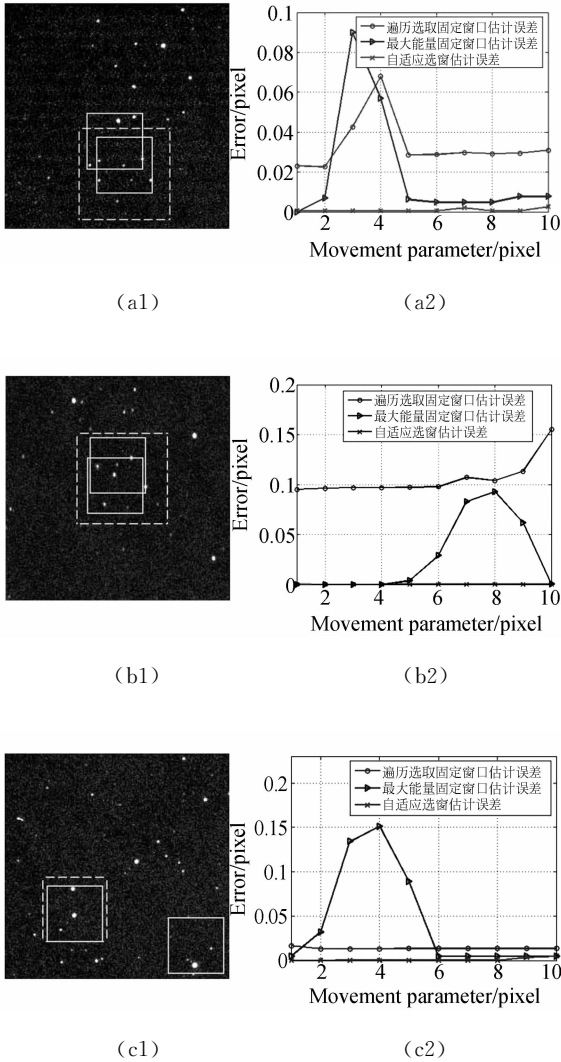


图 3 窗口选取结果比较

Fig. 3 Comparison of different analysis windows

其中能量最大的窗口即为遍历选取固定分析窗口。最大能量固定窗口为本文 3.2 节中(1)~(2)两步得到的分析窗口。假设图 3(a1)的运动参数为 $v_i=0; v_j=1, 2, \dots, 10$, 图 3(b1)的运动参数为 $v_i=1, 2, \dots, 10; v_j=0$, 图 3(c1)的运动参数为 $v_i=1, 2, \dots, 10; v_j=0$, 图 3(a2), (b2), (c2) 分别对应图 3(a1), (b1), (c1) 取不同分析窗口的运动参数估计误差。

可以看出,当分析窗口边缘存在亮度较大的恒星时,由于运动造成的恒星进场或出场导致了互相关运动参数估计误差较大,而本文算法成功地克服了这种现象,通过对 11 次观测(共约 600 frames)星图进行仿真分析,结论是本文算法对运动参数估计误差基本控制在 0.01 pixel 以内,在很大程度上提高了互相关运动参数估计的精度。

5 结 论

本文将流场测量 PIV 技术应用于序列星图运动参数估计,提出了一种基于自适应窗口选择 PIV 技术的序列星图运动参数估计算法,对某地基观测望远镜观测星图进行了不同运动参数仿真计算。结果证明,本文算法在很大程度上提高了运动参数估计的精度,避免了 PIV 分析窗口存在空白或错误矢量的情况,克服了互相关分析中恒星进场或出场对分析窗口互相关计算精度的影响,将运动参数估计误差降低到 0.01 pixel 以内,为序列星图配准奠定了基础。

参考文献:

[1] 彭华锋. 天基光电望远镜系统建模仿真研究[D]. 四川大学,2006.
 PENG H F. *Study on simulation of space based opto-electronic telescope*[D]. Sichuan University,2006. (in Chinese)

[2] 李广泽, 刘全国, 郝志航. 基于双正交小波的星点细分定位方法研究[J]. 光学精密工程, 2005,13(增):217-221.
 LI G Z, LIU J G, HAO ZH H. Research of subpixel subdivision location algorithm for star image based on biorthogonal wavelet[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005,13(Supp.):217-221. (in Chinese)

[3] 张辉, 钟建勇, 袁家虎,等. 电路噪声对星敏传感器星点定位精度的影响[J]. 光学精密工程, 2006,14(6):1052-1056.
 ZHANG H, QIAN J Y, YUAN J H, et al.. Circuit noise effects on star sensor position accuracy[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(6): 1052-1056. (in Chinese)

[4] 康琦, 申功忻. 全场测速技术进展[J]. 力学进展, 1997, 27(1): 106-120.
 KANG Q, SHEN G X. Progress in whole field measuring techniques for fluid flow velocity[J]. *Advances in Me-*

chanics, 1997, 27(1): 106-120. (in Chinese)

- [5] WILLERT C E, GHARIB M. Digital particle image velocimetry[J]. *Experiments in Fluids*, 1991, 10(4): 181-193.
- [6] ADRAIN R J. Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1991(23): 261-304.
- [7] 孙鹤泉, 康海贵. DPIV 流场测试技术中的数据处理[J]. 大连理工大学学报, 2000, 40(3): 364-367.
SUN H Q, KANG H G. Processing of DPIV data[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2000, 40(3): 364-367. (in Chinese)
- [8] 孙仲康. 快速傅里叶变换及其应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1982.
SUN ZH K. *Fast Fourier Transform and Application*[M]. Beijing: People's Posts and Telecommunications Publishing House, 1982. (in Chinese)
- [9] WESTERWELL J. Analysis of PIV interrogation with low pixel resolution[J]. *SPIE*, 1993: 624-635.
- [10] 廖斌, 杨卫平, 沈振康. 基于多帧移位叠加的红外小目标检测方法[J]. 红外与激光工程, 2002, 31(2): 150-153.
LIAO B, YANG W P, SHEN ZH K. Dim target detection algorithm based on multi-frame indexing accumulation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2002, 31(2): 150-153. (in Chinese)

作者简介: 陈维真(1960—), 女, 工程师, 山东青岛人, 主要研究方向为信息处理。E-mail: xiaohua800506@163.com

陈 标(1959—), 男, 江苏射阳人, 教授, 主要研究方向为海洋可见光遥感和海洋微波遥感等。E-mail: chenbiaojs@public.qd.sd.cn

● 下期预告

质谱熔样系统的研究与改进

卢慧卿, 王宝光, 晁中元, 李亚标

(天津大学 精密仪器与光电子工程学院 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

为了提高质谱仪熔样系统的熔样精度、效率和自动化程度, 以惰性气体同位素质谱仪为实验对象, 对熔样系统的智能化进行研究。主要完成对激光熔样系统中二维样品台的重新设计, 石墨炉进样系统的自动化设计。设计了一系列控制子程序, 并对视觉系统进行了标定。标定后的激光熔样系统有很高的精度, 重复性误差为 0.005 mm。改造后的熔样系统有很好的稳定性, 提高了效率。